第47卷 第10期
2024年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 10
Oct. 2024

东昆仑鲸鱼湖流域冰川、湖泊对气候变化的响应

陈丽花[1,2]， 车彦军[1,2]， 曹 昀[1]， 张明军[3,4]，
谷来磊[3,4]， 吴佳康[1,2]， 吕卫卫[1,2]

（1. 江西师范大学地理与环境学院，江西 南昌 330022；2. 宜春学院地理科学系，江西 宜春 336000；3. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；4. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要：以东昆仑鲸鱼湖流域为研究区，通过解译Landsat系列影像获取1990—2023年流域内冰川和湖泊范围，同时利用内陆水域水文时间序列数据库水位数据集和全球冰川物质平衡数据集，分析鲸鱼湖流域冰川面积、储量和物质平衡及鲸鱼湖面积、水位和储量变化特征。此外，结合ERA5再分析资料，探讨流域内冰川和湖泊的变化，及其对气候变化的响应过程。结果表明：（1）1990—2023年，鲸鱼湖呈现显著扩张趋势，从266.00 km^2扩张至399.30 km^2，面积扩张了133.30 km^2，扩张速率为4.66 $km^2\cdot a^{-1}$；2013—2023年湖泊水位上升5.19 m，水位上升速率为0.55 $m\cdot a^{-1}$；湖泊水量增加1.31 km^3，年增量为0.16 km^3。（2）1990—2023年流域内冰川呈现显著退缩趋势，冰川面积减小4.59 km^2，变化速率为-0.12 $km^2\cdot a^{-1}$，冰川储量减少0.38 km^3，变化速率为-0.01 $km^3\cdot a^{-1}$；2000—2020年冰川多年平均物质平衡为-1.22×10^{-4} m w.e.。（3）1990—2021年流域内年平均气温显著升高，年升温率为0.02 ℃$\cdot a^{-1}$，但是夏季升温不显著。年降水量显著增多，速率为2.11 $mm\cdot a^{-1}$，降水集中在夏季，夏季降水量占年降水量的78.9%。（4）流域内降水是导致湖泊扩张的主要因素。研究揭示了鲸鱼湖流域冰川、湖泊对气候变化的响应，可为当地政府优化水资源配置和管理提供参考。

关 键 词：鲸鱼湖；冰川；气候变化；东昆仑

文章编号：1000－6060(2024)10－1640－11(1640～1650)

冰川和湖泊是陆地表面水循环过程重要的组成部分，对气候变化异常敏感，是气候变化的天然指示器[1-3]。素有“亚洲水塔”[4-5]之称的青藏高原是山地冰川主要分布区之一，发育着地表最大的湖泊群。据遥感卫星调查显示，2018年青藏高原分布湖泊面积约5×10^4 km^2[6]，占中国湖泊总面积的57.2%[7]，冰川融水和降水是青藏高原湖泊的主要补给源[8-9]。全球气候变暖已成为不争的事实，气候变暖加速冰川消融，青藏高原湖泊扩张显著，湖泊的快速扩张打破区域内水循环动态平衡，进而影响区域气候。

全球气候变暖引起青藏高原山地冰川及其地表水文过程发生显著的改变[10]。2008—2018年中国冰川总体呈现持续退缩趋势，退缩速率为$-0.43\%\cdot a^{-1}$[11]，并且不同地区冰川变化表现出异质性，特别是藏东南地区退缩尤为显著[12-14]。高原气候的暖湿化[15]和冰川的加速持续退缩[16-17]，为湖泊的扩张提供水源。研究显示1970—2021年青藏高原湖泊面积和数量呈现先减少后增加趋势，1995年之后持续增加[9,18]。亚洲高山区湖泊长期演变的过程分析表明，不同区域湖泊的演变存在时空上的差异，但是总体上，1976—2000年湖泊面积、水位和体积表现出缓慢增

收稿日期：2024-02-15； **修订日期：**2024-06-03
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目（2021xjkk0100）；江西省自然科学基金项目（20232BAB203060）；国家自然科学基金项目（42101135，42461022）；江西省教育厅科学技术研究项目（GJJ2201708）；江西师范大学研究生国内外访学研究项目；甘肃省科技计划项目（22JR5RA091）资助
作者简介：陈丽花（1999-），女，硕士研究生，主要从事冰川冰湖演变与气候变化. E-mail: chen_lh@126.com
通讯作者：车彦军（1988-），男，副教授，主要从事冰川与冰湖作用研究. E-mail: che_yanjun@126.com

加，之后为持续快速增加[8-9,19]，并且导致湖泊扩张的主要原因是气候变暖引起的冰川融水径流增多和降水的增多[9,18]。山地冰川对气候变暖的敏感导致冰川快速持续萎缩[12]，冰川融水增加，对湖泊的补给也在增多，青藏高原冰川和湖泊与气候有着密切联系。

鲸鱼湖是东昆仑库木库里盆地海拔最高的封闭型湖泊，区域内降水、冰川融水和埋藏冰是鲸鱼湖的主要补给源，是库木库里盆地三大湖泊之一。鲸鱼湖位于木孜塔格—鲸鱼湖断裂带，具有非常典型的地质特征，主要是对该区域的地质构造及演化过程进行研究[20-21]。近年来，随着第三次新疆综合科学考察的开展，发现鲸鱼湖在近几十年来扩张十分显著，逐渐开始关注鲸鱼湖的演变。最新研究表明，2003—2022年鲸鱼湖的水位以0.57 $m \cdot a^{-1}$速率显著上升，20 a水位上升了约10 m[22]。关于鲸鱼湖流域湖泊演变、冰川变化及气候的研究几乎空白，三者之间的关系尚不明确。因此，本文选取东昆仑鲸鱼湖流域作为研究对象，分析流域内冰川、湖泊的变化及其对气候变化的响应。

本文利用Landsat影像获取1990—2023年湖泊和冰川范围，分析近几十年鲸鱼湖流域内湖泊和冰川的变化特征。同时，结合水位数据，分析鲸鱼湖2013—2023年水位变化特征，利用全球冰川物质平衡数据集和ERA5再分析资料，分析流域内冰川物质平衡变化和流域内局地气候变化特征，探讨鲸鱼湖流域冰川和湖泊对气候变化的响应，为后续水资源调查提供数据支撑。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

鲸鱼湖(36°19′N，89°26′E)位于若羌县东南部阿尔金山自然保护区内，是新疆、西藏和青海三省交界处最大的湖泊，也是库木库里盆地三大湖泊中海拔最高的封闭型咸水湖泊(图1)。选取的鲸鱼湖流域面积约为4000 km^2，2023年湖泊面积约为400 km^2，湖泊面积占流域面积的10%。2022年鲸鱼湖湖面水位约为4723 m，2023年冰川面积约为58 km^2，冰川覆盖率为1.5%。2002—2022年多年平均气温为−8.77 ℃，多年平均降水量为417.39 mm，流域内主要的植被类型为草地[22]。封闭型的高山湖泊主要由降水和冰雪融水补给，受西风环流和地形抬升的作用，流域内降水主要集中在夏季。

1.2　数据来源

1.2.1　*遥感数据*　本文使用Landsat系列影像数据提取冰川和湖泊边界，获取1990—2023年冰川和湖泊范围信息数据。使用的Landsat影像包括Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM+和Landsat-8/9 OIL/TIRS。为减少云层和积雪对冰川和湖泊的影响，提高冰川和湖泊提取的精确度，优先选取少云和少积雪影响的影像，获取的影像时间主要分布在夏季(7—9月)，共

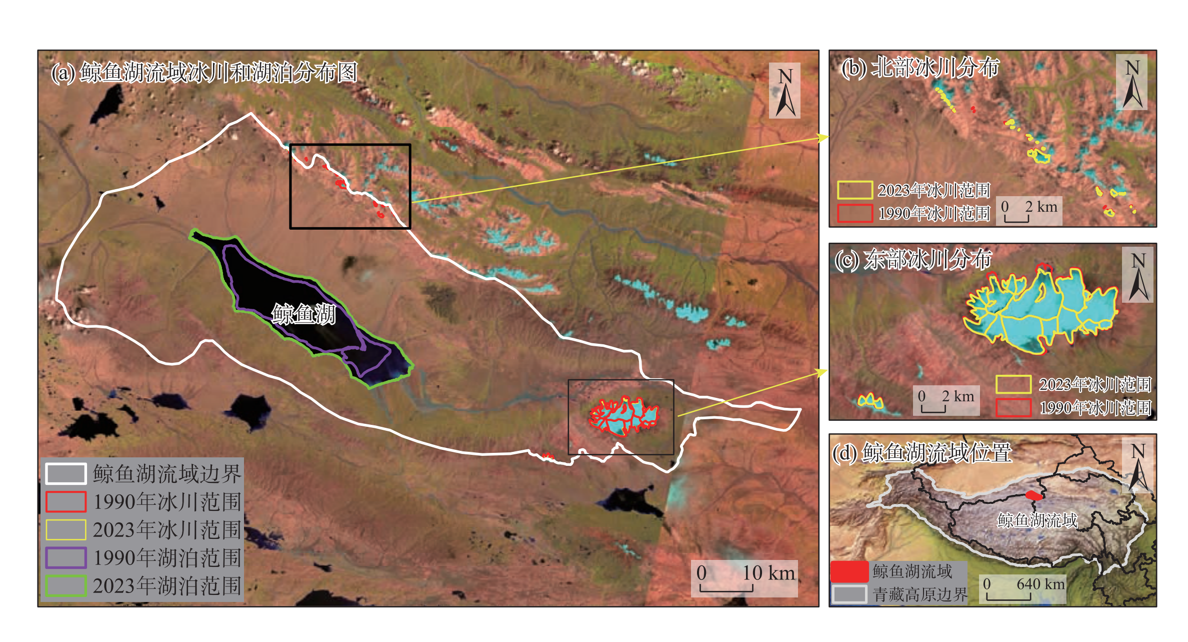


图1　鲸鱼湖流域示意图

Fig. 1　Overview of Jingyu Lake Basin

获取38幅影像(表1)。其中Landsat-7 ETM+的描线校正器在2003年损坏,导致该影像出现条带,需对影像进行修复,本文使用条带修复工具landsat_gap-fill.sav对因设备故障产生的条带填充处理[23-24]。数据来源于地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)和美国地质调查局(USGS)(https://earthexplorer.usgs.gov/)。

1.2.2 水位数据 内陆水域水文时间序列数据库(Database for Hydrological Time Series of Inland Waters, DAHITI)[25],DGFI-TUM于2013年开发,使用多

表1 遥感影像信息

Tab. 1 Information of remote sensing imagery

序号	数据类型	文件名称	日期(年-月-日)	云覆盖/%	用途
1	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19900621_20200916_02_T1_20200915_02_T1	1990-06-21	5.00	冰川/湖泊
2	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19910624_20200915_02_T1	1991-06-24	7.00	冰川/湖泊
3	Landsat5 TM	LT51400351992226BJC00	1992-08-13	2.00	冰川/湖泊
4	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19930715_20200914_02_T1	1993-07-15	16.00	冰川/湖泊
5	Landsat5 TM	LT51400351994199ISP00	1994-07-18	0.00	冰川/湖泊
6	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19950603_20200913_02_T1	1995-06-03	0.00	冰川/湖泊
7	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19960925_20170102_01_T1	1996-09-25	1.00	湖泊
8	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19970811_20200910_02_T1	1997-08-11	1.00	湖泊
9	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_19980814_20200908_02_T1	1998-08-14	10.00	湖泊
10	Landsat7 ETM+	LE71400351999237SGS01	1999-08-25	0.00	冰川/湖泊
11	Landsat7 ETM+	LE71400352000240SGS00	2000-08-27	5.00	冰川/湖泊
12	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20000904_20200907_02_T1	2000-09-04	5.00	冰川/湖泊
13	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20010721_20200906_02_T1	2001-07-21	1.00	冰川/湖泊
14	Landsat7 ETM+	LE07_L1TP_140035_20010814_20180228_01_T1	2001-08-14	27.00	冰川
15	Landsat7 ETM+	LE71400352002133EDC00	2002-05-13	4.00	湖泊
16	Landsat7 ETM+	LE07_L1TP_140035_20030921_20170124_01_T1	2003-09-21	0.00	冰川/湖泊
17	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20030913_20200904_02_T1	2003-09-13	29.00	冰川/湖泊
18	Landsat5 TM	LT51400352004259BJC00	2004-09-15	1.00	冰川/湖泊
19	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20050902_20200901_02_T1	2005-09-02	20.00	湖泊
20	Landsat5 TM	LT51400352006232IKR00	2006-08-20	17.00	冰川/湖泊
21	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20060905_20200831_02_T1	2006-09-05	27.00	冰川/湖泊
22	Landsat5 TM	LT51400352007203IKR00	2007-07-22	1.00	冰川/湖泊
23	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20080825_20200829_02_T1	2008-08-25	7.00	冰川/湖泊
24	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20090727_20200827_02_T1	2009-07-27	29.00	湖泊
25	Landsat5 TM	LT05_L1TP_140035_20100815_20200823_02_T1	2010-08-15	20.00	冰川/湖泊
26	Landsat7 ETM+	LE71400352011238PFS00	2011-08-26	0.00	湖泊
27	Landsat7 ETM+	LE71400352012257PFS00	2012-09-13	0.00	湖泊
28	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352013219LGN00	2013-08-07	11.85	冰川/湖泊
29	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352014206LGN02	2014-07-25	11.32	湖泊
30	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352015225LGN00	2015-08-13	4.97	湖泊
31	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352016196LGN01	2016-07-14	0.17	冰川/湖泊
32	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352017214LGN00	2017-08-02	0.16	冰川/湖泊
33	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352018201LGN00	2018-07-20	2.05	冰川/湖泊
34	Landsat8 OLI/TIRS	LC81400352019220LGN00	2019-08-08	3.46	湖泊
35	Landsat8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_140035_20201013_20201105_02_T1	2020-10-13	0.44	冰川/湖泊
36	Landsat8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_140035_20210728_20210804_02_T1	2021-07-28	0.73	冰川/湖泊
37	Landsat9 OLI/TIRS	LC09_L1TP_140035_20220723_20230406_02_T1	2022-07-23	0.31	冰川/湖泊
38	Landsat9 OLI/TIRS	LC09_L1TP_140035_20230811_20230811_02_T1	2023-08-11	2.37	冰川/湖泊

种测高卫星对湖泊、水库、河流和湿地进行水位估算，使用的测高卫星有TOPEX/Poseidon、Jason-1/2/3、GFO、ENVISAT、ERS-1/2、CryoSat-2、ICESAT、SARAL/Altika和Sentinel-3A。DAHITI所用的方法估算内陆水域水位时间序列的处理过程主要分为预处理、卡尔曼滤波和再处理3个步骤，其中卡尔曼滤波是估算水位数据的关键步骤，得到湖泊水位数据的均方根差在4~36 cm之间，河流水位数据均方根差在8~114 cm之间[25]。本文获取该数据集产品用于分析鲸鱼湖多年水位变化，其中鲸鱼湖水位估算使用的测高卫星有Sentinel-3B、SARAL。鲸鱼湖水位数据覆盖的时间范围为2013年4月—2024年1月，其中2015、2016年和2018年数据较少，2017年没有数据。考虑到解译冰川和湖泊的卫星影像时间范围在夏季(7—9月)，对应使用夏季水位(主要是8月)用于分析水位变化。另外，由于2016、2018年数据量少，没有夏季水位，因此用其他月份水位，分别是2016年5月、2018年12月代替。数据下载地址为https://dahiti.dgfi.tum.de/en/products/water-level-altimetry/。

1.2.3 物质平衡数据集 冰川物质平衡是指冰川积累和消融的差值，直接反应冰川变化[26]。本文采用Hugonnet等[27]基于遥感观测建立的全球冰川物质平衡数据集对鲸鱼湖流域2000—2020年冰川物质平衡进行分析，主要使用的遥感数据有Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer(ASTER) L1A、ArcticDEM、Reference Elevation Model of Antarctica(REMA)、TanDEM-X 90 m global DEM(TanDEM-X)。首先利用ASTER L1A生成ASTER DEM，再将所有的DEM进行配准，剔除高程测量误差，最后利用ICESat(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)和IceBridge的激光测高数据和光学高程数据，进行了交叉验证提高精度。

1.2.4 气象数据 处于无人区的鲸鱼湖流域长期缺乏地面观测资料，因此，本文使用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF)综合预报系统的全球网格气候产品对鲸鱼湖流域局地气候进行分析。ERA5-Land气候产品数据通过重分析ECMWF ERA5气候再分析的陆面部分得到，产品数据覆盖范围广，空间分辨率为0.1°×0.1°[28]。本文使用ERA5-Land再分析的月尺度气温和降水产品数据分析1951—2021年鲸鱼湖流域局地气候变化。数据下载地址：https://cds.climate.copernicus.eu/。

1.3 研究方法

1.3.1 冰川、湖泊范围解读 冰川编码是根据河流或湖泊流域代码命名，表示对应的冰川补给相应的河流或湖泊。鲸鱼湖流域代码为5Z142，因此，提取了冰川编码5Z142的冰川，发现补给鲸鱼湖的冰川较少，且多数是小冰川，受积雪影响大。考虑到提取冰川和湖泊边界的精确度，以及冰川数量少，决定采用人工目视解译提取冰川和湖泊的边界。人工目视解译法是解译冰川和湖泊边界最传统和精度最高的方法，缺点是需要大量的时间和精力[29]。为了更好地提取冰川和湖泊边界，在目视解译之前首先对Landsat数据进行预处理，凸显冰川和湖泊要素对象。由于Landsat影像已经经过了几何校正和地形校正，因此，使用ENVI对遥感影像直接进行辐射定标(FLAASH)、大气校正(FLAASH Atmospheric Correction)和波段合成(Landsat-5 TM合成1~5波段，Landsat-7 ETM+、Landsat-8 OIL/TIRS和Landsat-9 OIL/TIRS合成1~6波段)。此外，高分辨率的Google Earth历史影像及实地考察也用于验证和修正对冰川和湖泊边界。

1.3.2 湖泊、冰川体积计算

(1) 湖泊体积计算

本文利用湖泊水位和湖泊面积快速评估湖泊体积变化，计算公式如下[30-32]：

$$\Delta V = \frac{1}{3}\left(H_2 - H_1\right)\times\left(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \times S_2}\right) \quad (1)$$

式中：ΔV为湖泊蓄水量的变化；H_2-H_1为2个时间段水位变化；S_1和S_2为对应2个时间的湖泊面积。

(2) 冰川体积计算

鲸鱼湖流域冰川长期缺乏地面观测资料，无法准确估算冰川体积。为了快速评估冰川体积变化，本文采用经验公式计算冰川储量[33-34]。公式如下：

$$V = 0.0365A^{1.375} \quad (2)$$

式中：V为冰川体积；A为冰川面积。

1.3.3 气候分析 由于高原气候的特殊性，结合冰川学、水文学特征，将一年划分为夏季(暖季)和冬季(冷季)，其中5—9月为夏季，10月—翌年4月为冬季，分析鲸鱼湖流域夏季、冬季和全年平均气温和降水量变化趋势。

2 结果与分析

2.1 鲸鱼湖面积和水位变化

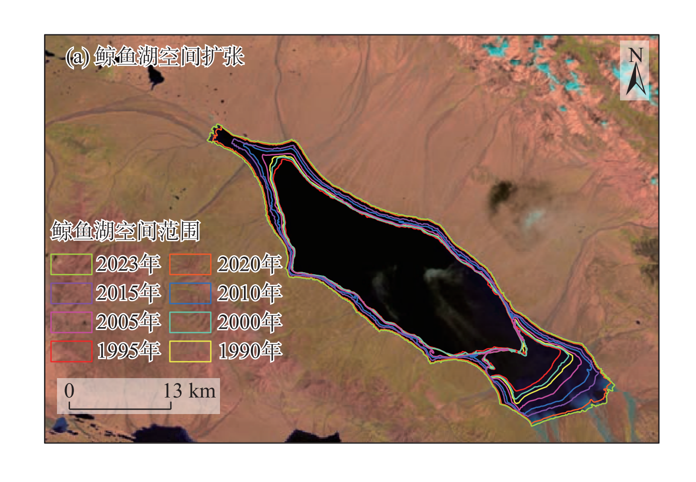
鲸鱼湖面积在1990—2023年持续扩张，扩张范围显著（图2a），且湖泊主要是往西北和东南方向扩张。1990—2023年湖泊面积扩张了133.30 km^2，扩张速率为4.66 $km^2 \cdot a^{-1}$。2023年湖泊面积最大，面积为399.30 km^2，1995年湖泊面积最小，面积为245.59 km^2。近33 a鲸鱼湖经过3个演变阶段（图2b），分别是1990—1995年的面积缩小阶段，该阶段面积减小20.42 km^2，年缩小率为4.27 km^2（通过显著性检验）；1996—2002年的面积波动变化阶段，总体来说，面积相对稳定但有所减小，面积减小3.74 km^2，年缩减率为0.14 km^2（未通过显著性检验）和2003—2023年面积持续快速扩张阶段，面积扩张117.21 km^2，年扩张速率为6.05 km^2（通过显著性检验）。

特别是，相邻2个阶段的湖泊面积均发生急速扩张，如1995—1996年，湖泊面积增加了10.85 km^2，占总扩张量的8.14%；2002—2003年，湖泊面积增加了29.40 km^2，占总扩张量的22.06%。此外，在持续快速扩张阶段（2003—2023年）也出现多次急速扩张，相邻年份湖泊面积扩张超过10 km^2有5次，即2009—2010年面积扩张17.13 km^2、2011—2012年面积扩张10.57 km^2、2016—2017年面积扩张13.27 km^2、2018—2019年面积扩张15.62 km^2、2022—2023面积扩张10.80 km^2。

鲸鱼湖面积在持续扩张，湖泊水位也在相应上升。2013年湖泊水位为4716.88±0.018 m，2023年水位为4722.07±0.005 m，2013—2023年这10 a间，湖泊水位上升了5.19 m，水位上升速率为0.55 $m \cdot a^{-1}$，湖泊水位有明显的持续上升趋势（图3a）。尤其是2022—2023年，水位上升了0.75 m，高出年平均上升水位。此外，由于2016—2018年数据缺失数据量少，导致该时期水位变化的误差较大，因此水位上升更明显，水位上升了2.59 m，年平均上升水位为1.29 m。夏季气温高，冰川融水增加及冻土的消融，夏季湖泊水位高于冬季湖泊水位，鲸鱼湖水位出现季节性波动上升趋势（图3b）。此外，对比2013—2016年和2018—2024年水位变化趋势，2018—2024年的水位上升速率明显快于2013—2016年（均通过显著性检验），水位上升速率在增大。

2.2 鲸鱼湖流域冰川面积和物质平衡变化

1990年和2023年冰川空间分布图，冰川主要分布在鲸鱼湖的东部（图1c），占该流域冰川94.4%，北部也分布有少量冰川（图1b），仅占5.6%。1990年流域内分布冰川为54条，冰川面积为62.62 km^2，2023年分布冰川51条，冰川面积为58.03 km^2，冰川条数减少了3条，冰川面积减小4.59 km^2，变化速率为−0.12 $km^2 \cdot a^{-1}$，该流域冰川面积呈显著减小趋势（图4a）。鲸鱼湖流域主要分布小冰川，2023年单条冰川面积平均为1.14 km^2，因此冰川边界受积雪的影响较大。最大的冰川在1990年面积为12.61 km^2，2023年面积为11.70 km^2，减小0.91 km^2，占区域内冰川总消融量19.83%，是该区域退缩量最大的冰川。



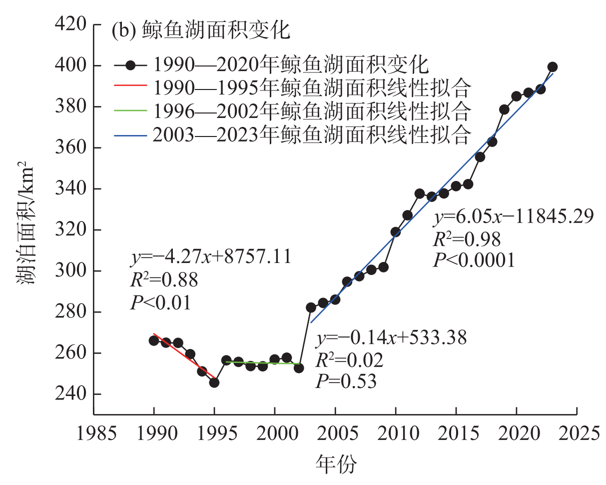


图2 1990—2023年鲸鱼湖空间扩张和面积变化

Fig. 2 Spatial expansion and area change of Jingyu Lake from 1990 to 2023

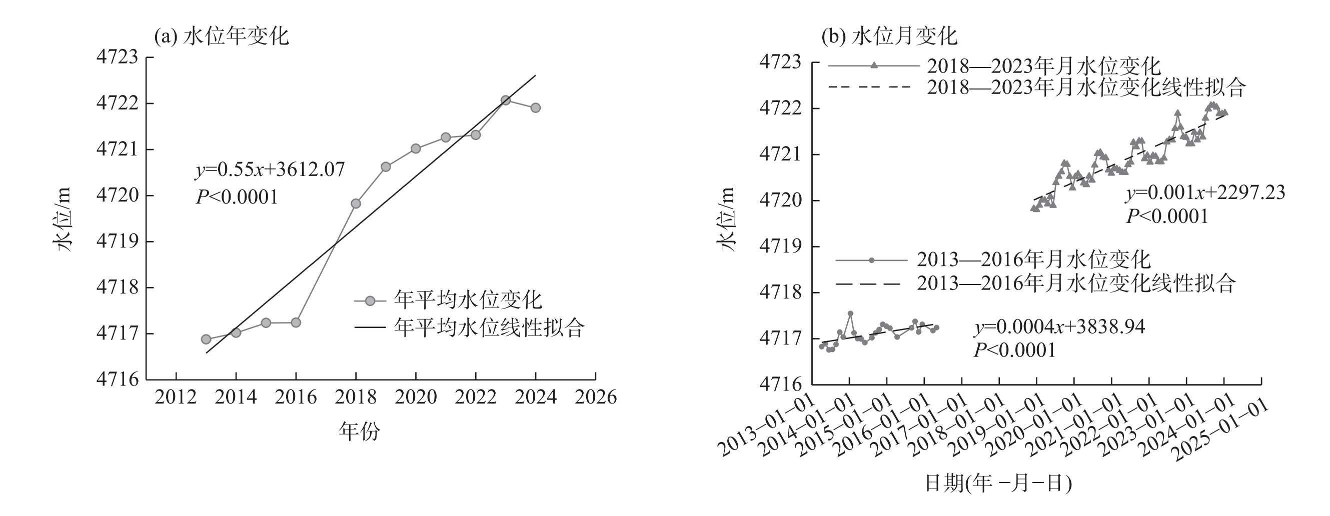


图3 2013—2023年鲸鱼湖水位变化

Fig. 3 Water level changes of Jingyu Lake from 2013 to 2023

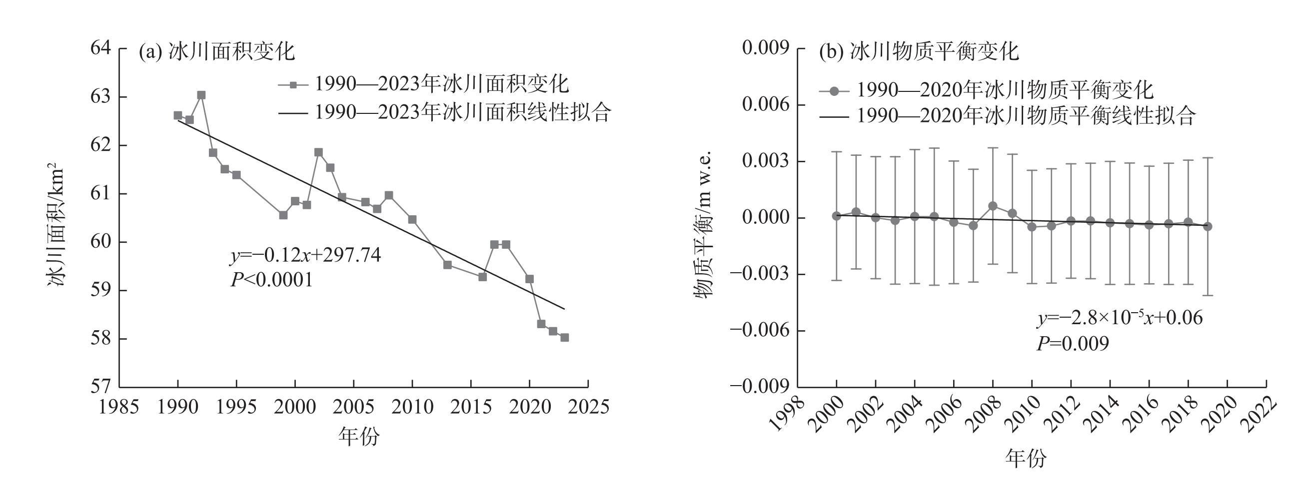


图4 1990—2023年鲸鱼湖流域冰川面积及物质平衡变化

Fig. 4 Temporal variation of glacier area and mass balance in Jingyu Lake Basin from 1990 to 2023

冰川物质平衡能直接反应冰川的动态变化。2000—2020年冰川多年平均物质平衡为-1.22×10^{-4} m w.e.，冰川多年平均累计物质平衡为-4.39×10^{-3} m w.e.，冰川物质平衡呈现显著下降的趋势(图4b)。此外，2007—2010年冰川物质平衡出现先增后快速下降，即2007—2008年冰川物质平衡从-4.07×10^{-4} m w.e.上升到6.37×10^{-4} m w.e.。冰川在2000—2009年冰川物质平衡为正，在2010—2020年冰川物质平衡为负，冰川由积累转为亏损。

2.3 鲸鱼湖及流域冰川储量变化

1990—2023年鲸鱼湖流域内冰川储量呈显著波动减少趋势(图5a)，1990年冰川储量为4.19 km^3，2023年冰川储量为3.81 km^3，近33 a冰川储量减少0.38 km^3，变化速率为-0.01 $km^3\cdot a^{-1}$。2014—2023年鲸鱼湖储量呈显著上升趋势(图5b)，累计增加1.31 km^3，年增量为0.16 km^3，2016—2017年和2017—2018年增加量最多，分别增加了0.31 km^3和0.32 km^3。总之，鲸鱼湖流域冰川储量明显减少，湖泊储量明显增多。

2.4 气候与湖泊和冰川变化的关联机制分析

2.4.1 鲸鱼湖流域气候变化 1951—2021年鲸鱼湖流域多年平均气温为-9.49 ± 0.82 ℃，年均最低气温在1983年为-11.68 ℃，年均最高气温在2023年为-7.41 ℃，年均气温呈显著升高趋势，年升温率为0.01 ℃$\cdot a^{-1}$(图6a)。此外，对应湖泊和冰川时间变化范围(1990—2021年)的气温变化，1990—2021年多年平均气温为-9.16 ± 0.83 ℃，最低气温在2000年为-10.60 ℃，最高气温在2023年为-7.41 ℃，年均升温

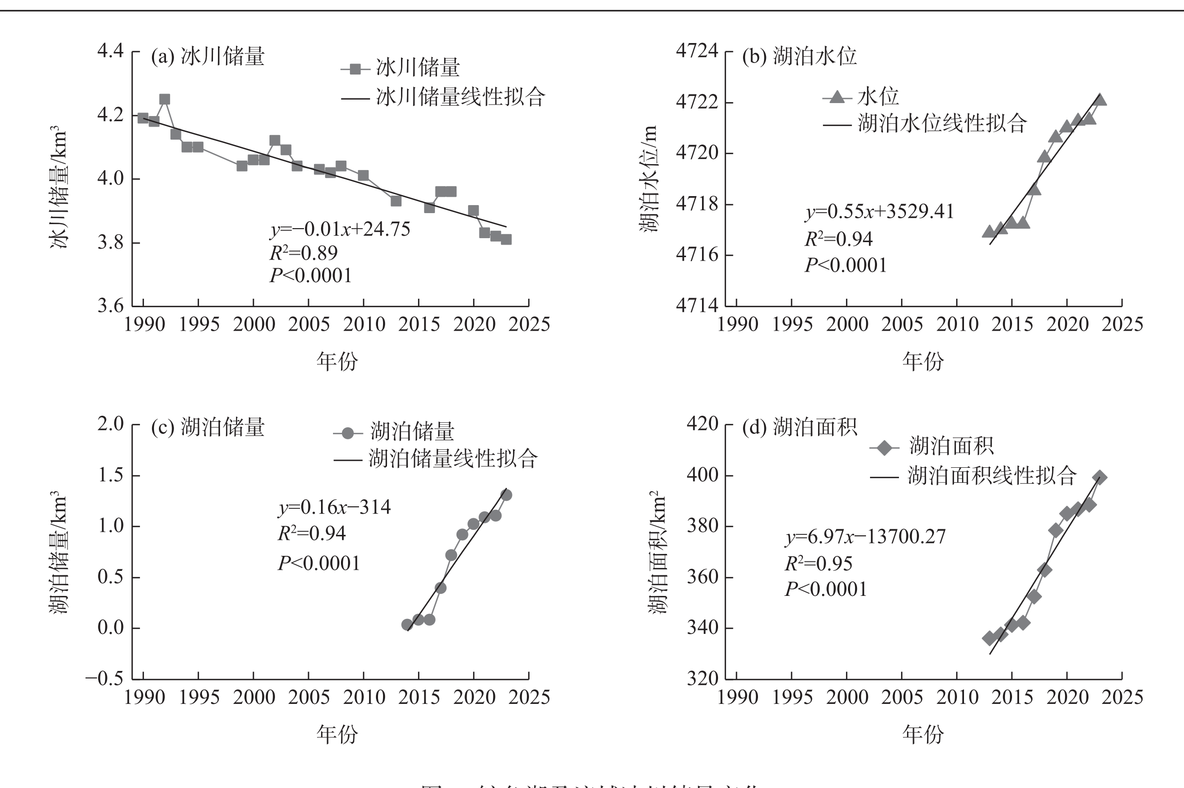


图5 鲸鱼湖及流域冰川储量变化

Fig. 5 Volume changes of Jingyu Lake and glaciers

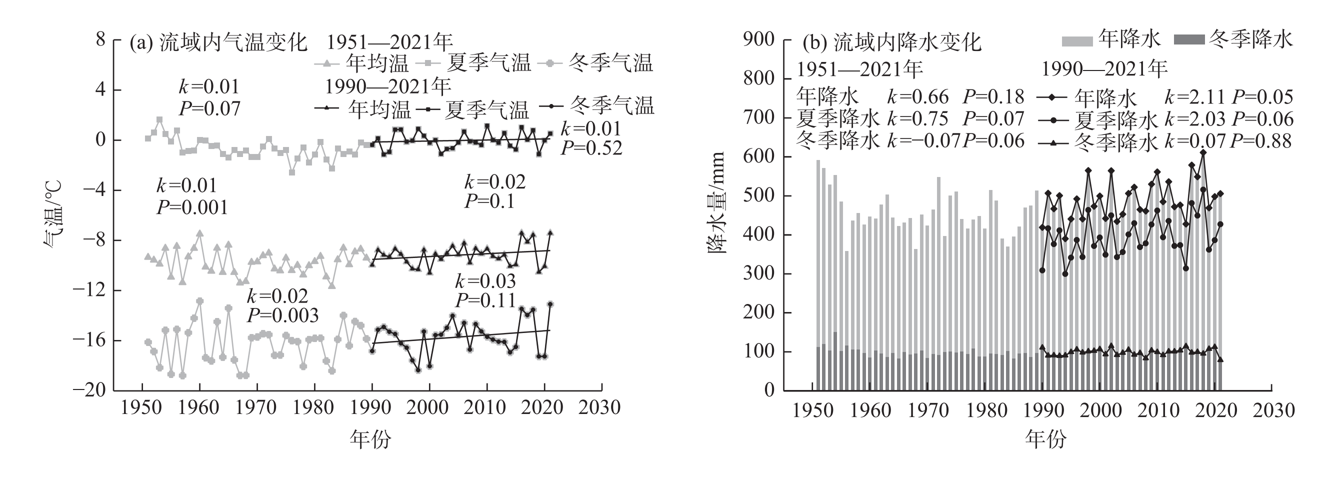


图6 1951—2021年鲸鱼湖流域气温降水量变化

Fig. 6 Changes in air temperature and precipitation of Jingyu Lake Basin from 1951 to 2021

率为0.02 ℃·a⁻¹,升温速率是1951—2021年升温速率的2倍。进一步分析夏季气温和冬季气温的变化情况,1951—2021年多年夏季平均气温为−0.38±0.76 ℃,气温没有显著上升(升温率为0.01 ℃·a⁻¹);多年冬季平均气温为−16.00 ℃,气温显著上升,升温率为0.02 ℃·a⁻¹,与年平均气温变化趋势及变化率一致。1990—2021年夏季平均气温、冬季平均气温及年平均气温与1951—2021年变化趋势一致,升温主要是发生在冬季。总的来说,在鲸鱼湖流域范围内,冬季是主要的升温季节,主导着年平均气温的变化。

1951—2021年多年平均年降水量为473.57±24.41 mm,最小年降水量在1956年为358.11 mm,最大年降水量在2018年为611.32 mm,年降水量呈显著增加趋势,增加速率为0.66 mm·a⁻¹(图6b)。此外,1951—1989年年降水量呈现明显的下降趋势,下降速率为−1.42 mm·a⁻¹,1990—2021年年降水量呈现明显的增加趋势,增加速率为2.11 mm·a⁻¹,是1951—

2021年的3倍。进一步分析冬季降水和夏季降水的变化情况，1951—2021年多年平均夏季降水量为373.77±21.99 mm，夏季降水量占年降水量的78.9%，夏季降水量呈显著增加趋势，增加速率为0.75 mm·a^{-1}；1990—2021年多年平均夏季降水量为393.11 mm，比1951—2021年多年平均夏季降水量高约20 mm，并且呈显著增加趋势，变化率为2.03 mm·a^{-1}；1951—2021年多年平均冬季降水量为98.71 mm，呈下降趋势，变化率为−0.07 mm·a^{-1}。在鲸鱼湖流域，降水主要集中在夏季，并且年降水量的变化主要是由夏季降水量变化主导。

2.4.2　鲸鱼湖流域冰川、湖泊面积变化的气候驱动　对湖泊面积、冰川面积与对应年份的气温和降水进行相关性分析和显著性检验发现，湖泊面积和冰川面积与气温和降水之间存在关系。气温和降水是影响冰川变化的主要气候因素，气温影响冰川的消融，而降水影响冰川的积累[16]。如图7所示，冰川与气温和降水均呈现负相关关系并通过显著性检验。这表明，降水带来的冰川积累不足以抵消气温带来的冰川消融，气温是影响冰川变化的主要因素，这与青藏高原其他地区冰川变化的驱动因素一致[35]。然而根据鲸鱼湖流域的区域气温和降水变化情况分析，1951—2021年鲸鱼湖流域年均气温呈现持续升高趋势，年降水量和夏季降水量呈现显著增多趋势，并且降水主要集中在夏季，夏季降水多为液态降水，液态降水带来的潜热也能加速冰川的消融。因此，在鲸鱼湖流域，气温升高和夏季降水量增多是影响冰川持续消融的主要因素。

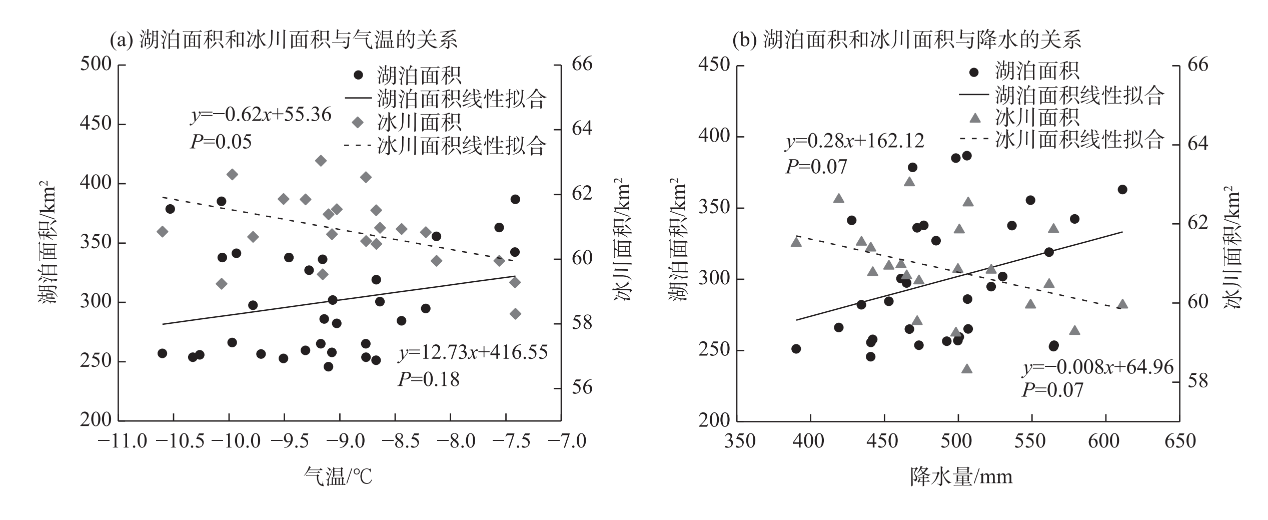


图7　冰川和湖泊面积与气温降水关系

Fig. 7　Relationship between glacier and lake area and temperature and precipitation

湖泊面积与气温和降水均呈现正相关关系并且通过显著性检验，即气温升高、降水增多，湖泊面积增大，反之湖泊面积减小。鲸鱼湖流域是东昆仑库木库里盆地海拔最高（海拔在4700 m以上）的封闭型湖泊，冰雪融水和降水是高原山地湖泊的主要补给源，影响湖泊变化[35]。气候变化通过直接和间接2种方式影响湖泊的演变。气温持续升高和夏季降水的增多导致冰川的持续消融，间接影响湖泊的补给，从而影响湖泊面积的变化。流域内降水的增多直接增加湖泊的补给影响湖泊的面积变化。然而，在鲸鱼湖流域地区，冰川覆盖率小，冰川范围仅占流域面积的1.5%，而流域内的多年平均年降水量约为473 mm并且降水在持续增多。此外，冰川的消融也受夏季降水的影响。因此，推断在鲸鱼湖流域，降水是影响湖泊面积变化的主要因素。

3　结论

本文利用Landsat系列数据、DAHITI水位数据、全球冰川物质平衡数据和ERA5再分析资料对鲸鱼湖流域冰川和湖泊的变化特征进行研究，并分析流域内冰川和湖泊对气候变化的响应关系，得出以下结论：

（1）近33 a，鲸鱼湖扩张显著。1990—2023年鲸鱼湖扩张133.30 km^2，扩张速率为4.66 km^2·a^{-1}；2013—2023年湖泊水位上升5.19 m，水位上升速率为0.55 m·a^{-1}；湖泊储量增加1.31 km^3，年增量为

$0.16\ km^3$。

（2）1990—2023年，鲸鱼湖流域冰川显著退缩。1990—2023年冰川面积减小4.59 km^2，变化速率为$-0.12\ km^2 \cdot a^{-1}$，冰川储量减少0.38 km^3，变化速率为$-0.01\ km^3 \cdot a^{-1}$。流域内主要分布小冰川，最大冰川面积为11.70 km^2，消融最多，占总消融量的19.83%，2000—2020年冰川多年平均物质平衡为-1.22×10^{-4} m w.e.。

（3）1990—2021年流域内多年平均气温为-9.16 ± 0.82 ℃，年升温率为0.02 $℃ \cdot a^{-1}$，冬季气温显著升高，夏季气温升温不显著；多年平均年降水量为492.13 ± 24.41 mm，年降水量上升率为2.11 $mm \cdot a^{-1}$，年降水量和夏季降水量显著增加，降水主要集中在夏季，夏季降水量占年降水量的78.9%。

（4）鲸鱼湖的扩张，主要是流域降水增加所致。

参考文献（References）

[1] Yi G, Zhang T. Delayed response of lake area change to climate change in Siling Co Lake, Tibetan Plateau, from 2003 to 2013[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(11): 13886-13900.

[2] 刘金凤, 田碧青, 吴常雪, 等. 1976—2021年纳木错和色林错湖泊面积变化及驱动因素分析[J]. 盐湖研究, 2024, 32(3): 61-68. [Liu Jinfeng, Tian Biqing, Wu Changxue, et al. Analysis of lake area changes and driving factors in Nam Co and Selin Co from 1976 to 2021[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(3): 61-68.]

[3] 秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 869-879. [Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 869-879.]

[4] 孔伟明, 韦孟丹, 胡垚坤, 等. 温升背景下"亚洲水塔"流域水资源压力现状及未来预估[J]. 冰川冻土, 2024, 46(1): 1-12. [Kong Weiming, Wei Mengdan, Hu Yaokun, et al. Current situation and future prediction of water stress in basins around the Asian Water Tower under the background of global warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(1): 1-12.]

[5] 张强, 王港, 赵佳琪, 等. 亚洲水塔水循环和水资源研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(36): 4982-4994. [Zhang Qiang, Wang Gang, Zhao Jiaqi, et al. Water circulation and water resources of Asia's water tower: The past and future[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(36): 4982-4994.]

[6] Zhong L, Ma Y, Xue Y, et al. Climate change trends and impacts on vegetation greening over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(14): 7540-7552.

[7] Zhang G, Yao T, Chen W, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 386-404.

[8] Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: 103269, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103269.

[9] Ma R, Duan H, Hu C, et al. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence?[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(24): L24106, doi: 10.1029/2010GL045514.

[10] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. Nature, 2020, 577(7790): 364-369.

[11] 赵华秋, 王欣, 赵轩茹, 等. 2008—2018年中国冰川变化分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 976-986. [Zhao Huaqiu, Wang Xin, Zhao Xuanru, et al. Analysis of glacier changes in China from 2008 to 2018[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 976-986.]

[12] Dehecq A, Gourmelen N, Gardner A S, et al. Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(1): 22-27.

[13] 丁悦凯, 刘睿, 张翠兰, 等. 喜马拉雅地区叶如藏布流域冰川和冰湖变化遥感监测研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1870-1880. [Ding Yuekai, Liu Rui, Zhang Cuilan, et al. Remote sensing monitoring of glacier and glacial lake changes in Yairu Zangbo Basin, Himalayas[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1870-1880.]

[14] 汤远航, 李梦琦, 邓铃, 等. 1990—2020年朋曲流域冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 27-36. [Tang Xuanhang, Li Mengqi, Deng Ling, et al. Glacier change and its response to climate change in Pumqu Basin during 1990—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 27-36.]

[15] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381. [Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979—2014[J]. Climate Change Research, 2016, 12(5): 374-381.]

[16] 段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237. [Duan Jianping, Wang Lili, Ren Jiawen, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century[J]. Progress in Geography, 2009, 28(2): 231-237.]

[17] 冀琴, 张翠兰, 丁悦凯, 等. 基于多源遥感数据的珠峰自然保护区冰川监测研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(10): 1591-1601. [Ji Qin, Zhang Cuilan, Ding Yuekai, et al. Glacier monitoring in Qomolangma Nature Reserve based on multi-source remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(10): 1591-1601.]

[18] 郝洁, 李靖瑄, 连子旭, 等. 青藏高原湖泊面积变化规律及影响

要素分析[J]. 水文, 2024, 44(1): 112−118. [Hao Jie, Li Jingxuan, Lian Zixu, et al. Analysis on variation of lakes and its influencing drivers for the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(1): 112−118.]

[19] 车彦军, 陈丽花, 谷来磊, 等. 东昆仑木孜塔格峰地区冰湖演变与冰川物质亏损[J]. 冰川冻土, 2023, 45(4): 1254−1265. [Che Yanjin, Chen Lihua, Gu Lailei, et al. Evolution of glacial lakes and glacier mass loss in Ulugh Muztagh area of eastern Kunlun Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(4): 1254−1265.]

[20] 岳跃破, 程蓉蓉, 姜玉丽. 东昆仑三岔顶地区鲸鱼湖组火山岩地球化学、年代学特征及其构造意义[J]. 西部资源, 2020(5): 166−171. [Yue Yuepo, Cheng Rongrong, Jiang Yuli. Volcanic rock geochemical, cheonological characteristics and tectonic significance of the Jingyuhu formation in the Sanchading area of eastern Kunlun[J]. Western Resources, 2020(5): 166−171.]

[21] 涂其军, 王新昆, 杨子江, 等. 木孜塔格-鲸鱼湖地区新生代火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. 新疆地质, 2007, 25(1): 11−17. [Tu Qijun, Wang Xinkun, Yang Zijiang, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Cenozoic volcanic rocks in Muztag-Cetacean Lake area[J]. Xinjiang Geology, 2007, 25(1): 11−17.]

[22] 刘玉婷, 陈亚宁, 朱成刚, 等. 2003—2022年昆仑山北坡典型湖泊水位变化及其归因[J/OL]. 干旱区地理, 1-13[2024-09-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20240812.1511.001.html. [Liu Yuting, Chen Yaning, Zhu Chenggang, et al. Water level changes and attribution of typical lakes on the northern slope of Kunlun Mountains from 2003 to 2022[J]. Arid Land Geography, 1−13[2024−09−21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20240812.1511.001.html.]

[23] Mölg N, Bolch T, Rastner P, et al. A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: Distribution of debris cover and mapping challenges[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(4): 1807−1827.

[24] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO−1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893−903.

[25] Schwatke C, Dettmering D, Bosch W, et al. DAHITI-an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(10): 4345−4364.

[26] Brun F, Berthier E, Wagnon P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(9): 668−673.

[27] Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century[J]. Nature, 2021, 592(7856): 726−731.

[28] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5−Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349−4383.

[29] Silverio W, Jaquet J M. Glacial cover mapping (1987—1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(3): 342−350.

[30] Wang L, Zhao L, Zhou H, et al. Contribution of ground ice melting to the expansion of Selin Co (lake) on the Tibetan Plateau[J]. Cryosphere, 2022, 16(7): 2745−2767.

[31] Zhang G, Chen W, Xie H. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat−2 and Landsat Missions[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(22): 13107−13118.

[32] Zhang G, Yao T, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(11): 5550−5560.

[33] Moeller M, Schneider C. Calibration of glacier volume-area relations from surface extent fluctuations and application to future glacier change[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(195): 33−40.

[34] Adhikari S, Marshall S J. Glacier volume-area relation for high-order mechanics and transient glacier states[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16): L16505, doi: 10.1029/2012GL052712.

[35] 高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 9−16. [Gao Xiaoqing, Tang Maocang, Feng Song. Discussion on the relationship between clacial fluctuation and climate change[J]. Plateau Meteorology, 2000, 19(1): 9−16.]

Responses of glacier and lake to local climate change in the Jingyu Lake Basin, east Kunlun Mountains

CHEN Lihua[1,2], CHE Yanjun[1,2], CAO Yun[1], ZHANG Mingjun[3,4], GU Lailei[3,4], WU Jiakang[1,2], LYU Weiwei[1,2]

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China; 2. Department of Geographical Science, Yichun University, Yichun 336000, Jiangxi, China; 3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Glaciers and lakes are highly sensitive to climate change. This study examines the boundaries of glaciers and lakes in the Jingyu Lake Basin, east Kunlun Mountains from 1990 to 2023 using Landsat series imagery. In addition, the DAHITI water level dataset and the global glacier mass balance dataset were utilized to analyze changes in glacier area, volume, and mass balance, as well as the area, water level, and volume of the Jingyu Lake Basin. ERA5 meteorological reanalysis data were employed to assess the response of glaciers and lakes in the basin to climate change. The results indicate a significant expansion trend in the Jingyu Lake. From 1990 to 2023, Jingyu Lake expanded by 133.30 km^2 at a rate of 4.66 $km^2 \cdot a^{-1}$. Between 2013 and 2023, the lake's water level rose by 5.19 m, with an annual increase rate of 0.55 $m \cdot a^{-1}$, and its volume increased by 1.31 km^3, averaging an annual increment of 0.16 km^3. During the same period, the glacier area decreased by 4.59 km^2 at a rate of -0.12 $km^2 \cdot a^{-1}$, and the glacier volume declined by 0.38 km^3 at a rate of -0.01 $km^3 \cdot a^{-1}$. The average annual glacier mass balance from 2000 to 2020 was -1.22×10^{-4} m w.e. The average annual temperature in the Jingyu Lake Basin increased significantly from 1990 to 2021, with an annual warming rate of 0.02 ℃$\cdot a^{-1}$. In contrast, summer precipitation showed no significant warming trend, while the annual precipitation increased notably at a rate of 2.11 $mm \cdot a^{-1}$, with 78.9% of precipitation occurring in summer. Precipitation is identified as the primary factor contributing to lake expansion in the basin. This study highlights the response of glaciers and lakes in the Jingyu Lake Basin to climate change, providing valuable insights for local governments in optimizing water resource allocation and management.

Key words: Jingyu Lake; glaciers; climate change; east Kunlun Mountains